

## **Techniques expérimentales pour la caractérisation mécanique de maquettes in vitro de cordes vocales**

F. Silva, N. Hermant, X. Laval et X. Pelorson

GIPSA-lab UMR 5216, 11 rue des mathématiques, BP 46, 38402 Saint-Martin-D'Hères, France  
fabrice.silva@gipsa-lab.fr

La validation des modèles élaborés en production vocale nécessite la mise au point de dispositifs *in-vitro* simples mais pouvant reproduire des phénomènes physiques impliqués dans la production vocale humaine. Depuis les travaux de Van den Berg (1957), de nombreuses maquettes ont été développées avec une complexité croissante. Dans cette communication, nous nous intéressons à la caractérisation mécanique des structures vibrantes, dont la connaissance est indispensable à la reproductibilité et la répétabilité des mesures ultérieures sur la maquette ainsi qu'à l'analyse des résultats. Plusieurs techniques expérimentales sont testées sur une maquette de cordes vocales. Les résultats sont comparés en fonction des différents principes de mesure (vibrométrie laser, mesure de l'ouverture glottique, accéléromètres piézo-électriques), actionneurs (pot vibrant et source acoustique) et types d'excitation (fréquence par fréquence, sinus glissant et bruit large bande).

## 1 Introduction

La littérature présente de nombreux modèles cherchant à décrire les mécanismes impliqués dans la production de la voix [11, 21, 13, 22]. L'attention est essentiellement portée à la principale source sonore, proposant des modélisations de l'écoulement glottique dans un canal à géométrie variable ([6] par exemple). En parallèle, des répliques expérimentales sont conçues pour permettre la validation de ces théories, mais avec un intérêt relativement faible pour la caractérisation mécanique des structures vibrantes qui interagissent avec l'écoulement et la confrontation avec les modèles théoriques simplifiés. De manière assez récente, c'est dans la communauté d'acoustique musicale et sur lèvres artificielles que l'on trouve les premiers essais mécaniques [5] reposant sur une excitation acoustique externe (haut-parleur) et une mesure de la section d'ouverture par méthode optique (faisceau laser partiellement intercepté par les lèvres). Par la suite, le dispositif s'est enrichi d'un vibromètre laser à effet Doppler pour la mesure de réponses fréquentielles et de caméras rapides pour appréhender le mouvement axial et transverse de grande amplitude par suivi de marqueurs [18].

Ruty et coll. adaptent la technique du faisceau laser intercepté avec excitation acoustique à un clone de la maquette de lèvre [20] et à une maquette à profil triangulaire à géométrie plus proche de la physiologie humaine [19]. Plus récemment et pour répondre à des difficultés d'amplitude de vibration trop faible, Hermant et coll. [9] adopte une excitation par pot vibrant sur cette dernière maquette, de manière similaire aux expériences *in-vivo* de Svec et coll. [24] (laryngoscopie) et Chan [4] (vibromètre laser à effet Doppler).

La robustesse des estimations des réponses fréquentielles est un enjeu important dans le cadre de l'identification des paramètres intervenant dans les modèles mécaniques simplifiés comme le classique modèle à deux masses proposé par Ishizaka et Flanagan [11]. Ceci suppose que les résonances présentées par les réponses fréquentielles puissent être interprétées en termes de déformées spatiales et puissent être rapprochées des modes du modèle simplifié. Par exemple, un résultat intéressant de Richards [18] concerne les deux premiers modes de vibration exhibés par les mesures vibrométriques. Ces modes (à 92Hz et 122Hz sur la figure 4.10) présentent un mouvement essentiellement axial avec une composante transverse faible. Selon la compréhension actuelle de la production de la voix, ils ne participeraient pas ou peu à la modulation du débit glottique et ne devraient pas être exploités pour l'identification paramétrique du modèle à deux masses qui n'autorise pas ces mouvements.

Le présent papier s'inscrit dans une optique de synthèse

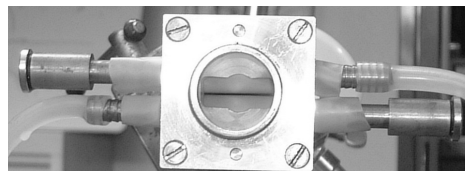


FIGURE 1a – Vue de face de la maquette tubes.



FIGURE 1b – Gauche : vue latérale de la maquette à profil triangulaire en cours d'assemblage (une seule corde vocale montrée). Droite : maquette assemblée avec pression d'eau établie.

et comparaison des différentes techniques d'excitation et mesure. Les sections 3 et 4 présentent leur utilisation dans le contexte des maquettes de cordes vocales présentées brièvement en Sec. 2. Suivent en Sec. 5 quelques résultats expérimentaux partiels.

## 2 Maquettes de cordes vocales

Depuis les travaux de Vilain [23], de nombreuses répliques ont été conçues au GIPSA-lab, avec divers niveaux de complexité pour répondre à des difficultés expérimentales ou pour permettre de mieux comprendre des configurations non simplifiées comme des asymétries antéro-postérieures ou la présence de nodules [10]. Nous présentons ici les dernières maquettes. Dans les deux cas, les cordes vocales peuvent être reliées en amont à une source de pression via un tube rigide, et en aval à un guide d'onde jouant le rôle de conduit vocal.

### 2.1 Maquette tubes

Issue de Ref. [8], elle a été adaptée par Vilain pour l'étude de la production de la voix (cf Fig. 1a, description détaillée dans [23]). Elle est constituée de deux tubes de latex rempli d'eau, montés dans un support métallique. Le seul moyen d'action est la pression d'eau dans le latex, agissant sur l'ouverture glottique au repos et sur les propriétés mécaniques des structures vibrantes.

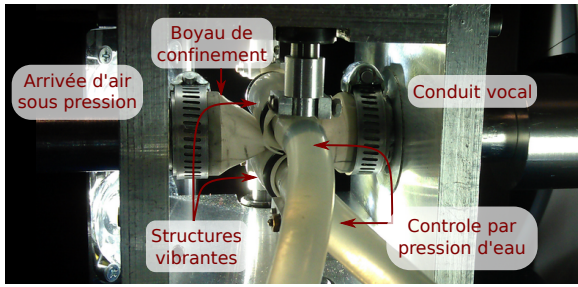


FIGURE 1c – Vue latérale de la maquette à écoulement confiné

## 2.2 Maquette à profil triangulaire

Cette maquette (cf Fig. 1b) a été mise au point au cours de la thèse de Ruty [19] et est constituée de deux supports métalliques à profil triangulaire couverts par une enveloppe de latex contenant de l'eau sous pression variable. L'ensemble est finalement inséré dans un bâti permettant le rapprochement ou l'écartement des membranes gonflables. Cette réplique a servi précédemment à l'étude de l'influence du couplage acoustique sur les seuils d'oscillation [19] ou encore l'effet des bandes ventriculaire sur l'écoulement glottique [1]. Krebs et coll. [12] exhibent de nombreux modes de vibrations en auto-oscillations, pour une maquette identique avec du latex plus fin ( $< 0.1\text{mm}$  pour  $0.2 - 0.3\text{mm}$  au GIPSA-lab).

## 2.3 Maquette à écoulement confiné

La dernière maquette, présentée plus en détail dans [17], cherche à résoudre les difficultés d'étanchéité en eau et en air de la maquette précédente. Elle s'appuie pour cela sur une membrane cylindrique entre la «trachée» et le «conduit vocal» qui est comprimée par deux structures vibrantes «latex+eau» formant la constriction glottique. Un intérêt majeur de cette maquette est de permettre la simulation de configurations pathologiques par asymétries antéro-postérieures ou par présence d'excroissances placées entre les deux membranes de latex (cf Ref. [10]).

# 3 Techniques d'excitation

La robustesse des estimations paramétriques dépend en grande partie de la qualité des mesures de réponses fréquentielles (FRF), notamment la manière dont les hypothèses inhérentes aux FRF ont été prises en compte dans la conception du plan d'expérimentation. Les FRF n'ont de sens que dans un cadre respectant les impératifs de linéarité, de réciprocité et d'invariance temporelle. Sans prétendre à l'exhaustivité, nous revenons, au regard de ces considérations, sur les techniques d'excitation couramment utilisées dans la communauté.

## 3.1 Source acoustique

C'est le type d'excitation la plus courante, car supposément la plus proche du mécanisme d'excitation des structures vibrantes lors des auto-oscillations. Si sa mise en œuvre paraît simple grâce à un simple haut-parleur ou une chambre de compression (Rondson TU-100, cf

Fig. 2a), elle présente l'inconvénient de nécessiter un très fort niveau d'excitation pour réussir à produire des vibrations mesurables. Au contraire des maquettes de bouche artificielle où la source acoustique excite les lèvres via ce volume (avec une transmission mécanique non contrôlée par le bâti), les essais sur maquettes de cordes vocales ont fait intervenir un cône convergent «focalisant» l'énergie acoustique sur les structures vibrantes de manière parfois destructrice. En effet l'augmentation du rendement se fait au détriment du transducteur électro-mécanique, poussé dans ses limites de linéarités, voire de fonctionnement, et ceci invalide clairement le premier des critères énoncés ci-dessus.

## 3.2 Excitations mécaniques

### 3.2.1 Pot vibrant

Une optimisation de la puissance transmise d'excitation se fait par l'utilisation d'actionneurs mécaniques directs, au premier titre desquels le pot vibrant (TMS K2004E01, cf Fig. 2b) dont le palpeur est muni d'un accéléromètre (PCB 353B18). Cette méthode présente l'avantage d'une possibilité de sélectionner les modes vibratoires excités via la direction imposée du palpeur, au détriment d'une forte intrusivité par contact direct avec la membrane. Une force (et direction) d'appui trop forte peuvent modifier substantiellement les fréquences de résonances, mais une force trop faible peuvent engendrer des non-linéarités par contact intermittent.

Une variante consiste en l'utilisation d'un générateur de vibration opérant sur l'ensemble de la maquette (cf Fig. 2c). Toutefois la technique avec palpeur présente l'avantage de mesures *in-situ* des maquettes connectées au réservoir de pression.

### 3.2.2 Marteau d'impact

Des essais de type choc sont également possibles en utilisant un marteau d'impact (PCB 086c03, cf Fig. 2d). Ceci correspond à un moyen d'excitation calibré, avec une information de force en retour. Dans le cadre des maquettes du GIPSA-lab, la nature monoaxiale de l'excitation est relativement préservée malgré une transmission indirecte des vibrations à la membrane et au fluide. Cette technique requiert un manipulateur expérimenté, la frappe devant être à contact unique, sans rebonds.

# 4 Observables

## 4.1 Aire glottique

Le montage optique est celui présenté en Ref. [5]. L'ajustement optique permet de mesurer, à l'aide d'une photodiode, le flux lumineux provenant d'un faisceau laser large incident sur la glotte dans toute sa largeur. L'étalonnage donne ensuite une estimation de l'aire glottique (cf Ref. [19]).

Il est intéressant de constater que ce réglage diffère de celui de Ref. [5], où le faisceau est moins large sur la fente donnant une mesure de la hauteur de l'ouverture interlabiale dans la zone éclairée. La section 5.2.1 présente des résultats obtenus avec une méthode comparable via l'utilisation de



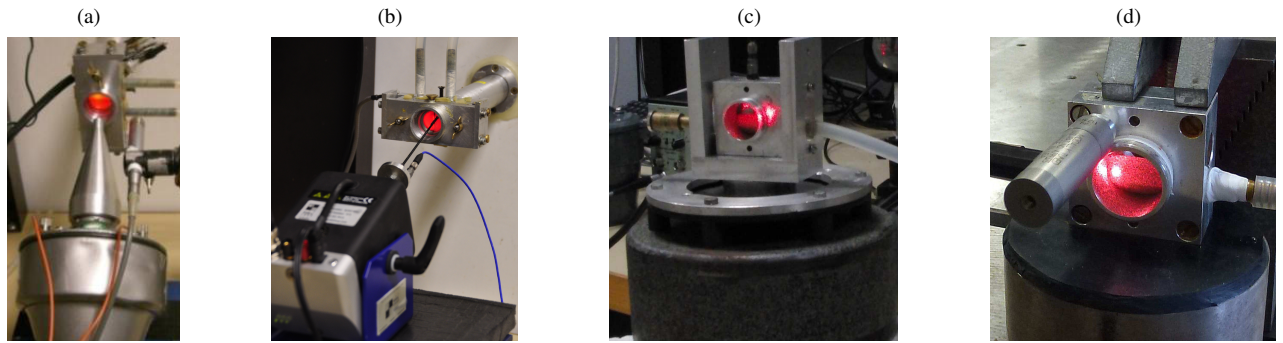


FIGURE 2 – De gauche à droite : (a) excitations acoustique, (b) par pot vibrant avec palpeur, (c) par générateur de vibrations, et (d) marteau d'impact.

fentes larges pour estimer l'ouverture en divers abscisses de l'ouverture glottique. Au contraire, Richards [18] et Bromage et coll. [3] mettent en évidence une relation non linéaire entre déplacement transverse des lèvres et section d'ouverture du fait des commissures mobiles. Ceci introduit notamment des résonances apparentes dans les fonctions de transfert de raideur dynamique estimées à partir de la mesure d'aire glottique (à 173Hz, 334Hz et 444Hz sur Fig. 4.10 de [18]).

## 4.2 Déplacement axial ponctuel

Des essais préliminaires avec vibromètre laser à effet Doppler (Polytec OFV-505) ont pu être réalisés au FEMTO-st. Le faisceau impacte la surface aval de la membrane latex avec une incidence parallèle à l'axe de l'écoulement. Un balayage manuel ou automatique de la surface est possible pour une estimation conjointe des déformées modales (cf Fig. 3b et c). Toutefois des difficultés arrivent du fait de la forte diffraction du laser par la structure interne du latex, et pour des points de mesure trop proches de la glotte où le point matériel visé varie au cours du mouvement de la membrane en conséquence de l'incidence oblique voire rasante.

## 4.3 Déplacements transverses

Une caméra rapide (EoSens Cube 7, positionnée dans l'axe en aval du conduit vocal) a permis de visualiser les mouvements transverses des plis vocaux à des vitesses d'acquisition allant jusqu'à 1000 images par seconde. Au-delà, les conditions d'éclairages et les réglages de temps d'exposition s'avèrent problématiques pour donner un contraste et une netteté acceptables, notamment en auto-oscillations.

Malgré ces difficultés, un calcul pyramidal de flot optique entre images successives (méthode de Lucas-Kanade) permet le suivi de marqueurs dessinés sur le latex (cf Fig. 3d), et ainsi une représentation du champ de déplacement de la face apparente des structures vibrantes alors que l'analyse classique consiste en la segmentation des images pour déterminer les contours de l'ouverture glottique [24, 16, 3, 19]. Toutefois, aux niveaux d'excitation utilisés pour l'estimation de réponse fréquentielle, les amplitudes de vibration sont extrêmement faibles et les mesures sont bruitées par la faible résolution des images en dépit d'un calcul subpixel de flot optique [2].

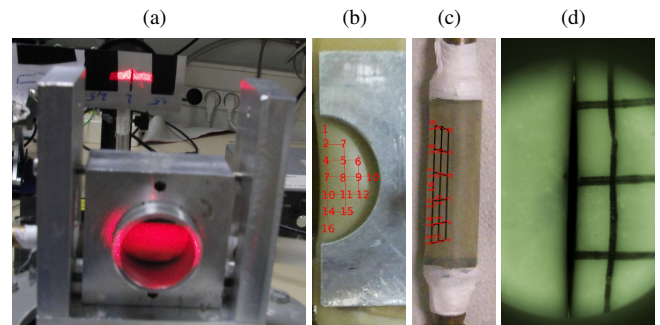


FIGURE 3 – De gauche à droite : (a) Éclairage de la glotte par faisceau laser, et obturation par fente large (en arrière plan) ; (b-c) Points d'acquisition vibrométrique pour les maquettes à profil triangulaire (b) et à écoulement confiné (c) ; (d) Marqueurs pour le suivi vidéo.

# 5 Résultats

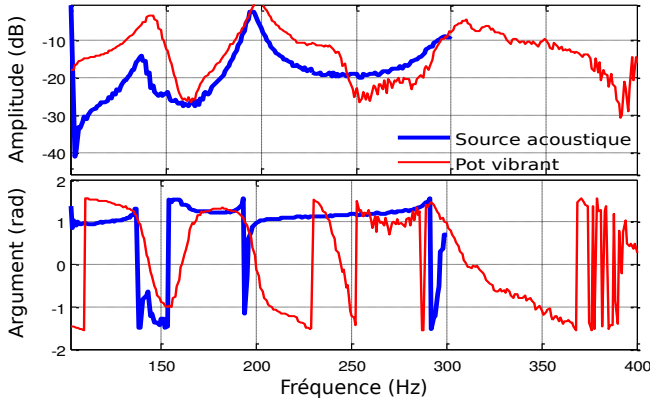
Nous présentons ici quelques résultats permettant d'appréhender l'influence du choix de l'actionneur, des grandeurs observées et des traitements réalisés pour l'estimation des FRF. En complément de cette section, la communication [10] des mêmes auteurs présente l'effet de la présence de polypes sur le comportement fréquentiel de la maquette à écoulement confiné.

## 5.1 Comparaison des sources

Nous présentons d'abord des mesures de FRF obtenues avec une excitation en bruit blanc à bande limitée 50 – 400Hz et de durée 30s, avec mesure par le montage optique (Sec. 4.1) et excitation par la source acoustique ou le pot vibrant. Les densités spectrales et inter-spectrales des signaux de référence (tension appliquée au pot vibrant ou à la chambre de compression), d'excitation (accélération de l'actionneur ou pression à proximité des plis) et de sortie (ouverture glottique dérivée du flux optique après étalonnage) sont estimées à partir des périodogrammes respectifs (moyennes sur 60 trames sans recouvrement) avec un pas fréquentiel de l'ordre de 1Hz (voir [15] par exemple pour une explication détaillée de la méthode).

La figure et la table 4 montrent les différences entre FRF et paramètres modaux pour deux excitations différentes sur la maquette en biseau. Les écarts entre fréquences de

résonance sont relativement faibles, notamment au regard de la variabilité de la mesure avec pot vibrant pour laquelle des changements de position du point de contact du palpeur introduit une dispersion de l'ordre de 3Hz sur la première résonance et 7Hz sur la deuxième (cf Ref. [9]).



	$f_1$	$Q_1$	$f_2$	$Q_2$
Source acoustique	137Hz	21	195Hz	28
Pot vibrant	140Hz	14	198Hz	20

FIGURE 4 – FRF (mesure d'aire glottique) et les excitations acoustique et mécanique.

## 5.2 Complémentarité des observations

### 5.2.1 Vibrations transverses

La figure 5 montre les FRF estimées à partir d'une excitation par pot vibrant et d'une mesure d'aire glottique totale (en haut) et avec des filtres (fentes de 2mm) qui permettent une estimation de la hauteur d'ouverture en plusieurs positions le long de la glotte. Le traitement des signaux est le même qu'en Sec. 5.1. Il est intéressant de noter la FRF obtenue avec l'aire totale présente des résonances également présentes de manière localisée sur les FRF «partielles». Il n'apparaît ici pas de résonance supplémentaire, notamment du fait des conditions d'expérimentation : seul un pli vocal est présent (un cache obstrue la lumière comme le ferai l'autre pli) et il n'y a pas en conséquence de phénomène non linéaire dû au déplacement des commissures comme observé par Richards [18]. Malgré la faible résolution spatiale, l'analyse des déformées modales est possible et aboutit à une identification des motifs vibratoires transverses d'ordre 0 (un lobe le long de la glotte) à  $f_0 = 82\text{Hz}$  et  $f_2 = 200\text{Hz}$ , d'ordre 1 (deux lobes) à  $f_1 = 129\text{Hz}$ , et d'ordre 2 (trois lobes) à  $f_3 = 284\text{Hz}$ .

### 5.2.2 Vibrations axiales

La même maquette a fait l'objet d'essais transitoires (avec marteau d'impact) et mesure des vitesses axiales (avec le vibromètre). Ces mesures ont été réalisées au FEMTO-st, à quelques semaines d'intervalle, avec des variations non négligeable de pression interne aux structures vibrantes et un potentiel vieillissement ou relaxation du latex, ce qui peut expliquer les différences de fréquences de résonance exposées ci-après.

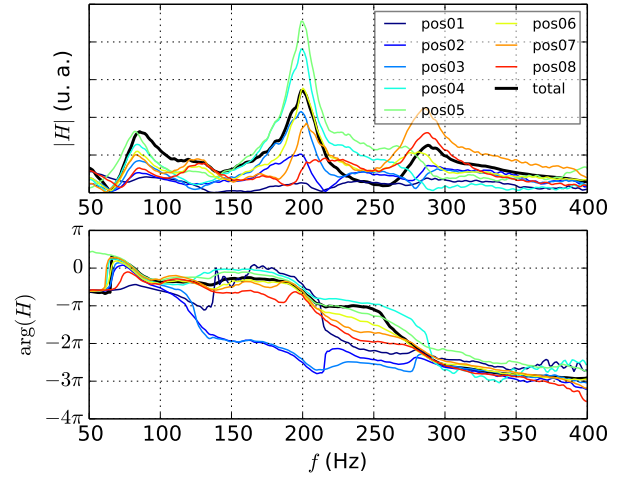


FIGURE 5 – FRF pour l'ouverture totale (trait épais) ou partiel (traits fins en couleurs).

Bien que des méthodes permettent une analyse modale directement dans le domaine temporel (cf [14] par exemple), le traitement effectué (via le logiciel SigLab) sur les signaux transitoires de force et de vitesse axiale (en plusieurs points de la face aval) consiste en l'estimation des FRF par la même méthode que ci-dessus (pas de 0.15Hz), suivi d'une moyenne sur trois acquisitions. L'analyse modale est ensuite faite de manière indépendante sur chaque point ( $N$  analyses SISO) et une reconstruction spatiale des déformées modales est possible par interpolation 2D (cf Fig. 6). Les fréquences de résonance diffèrent sensiblement de celles données en Sec. 5.2.1, mais il est possible de retrouver des modes de vibration d'ordre 0 (le long de la glotte, haut-bas sur les représentations) pour  $f_0 = 75\text{Hz}$  et  $f_2 = 164\text{Hz}$ , d'ordre 1 à  $f_1 = 139\text{Hz}$ , et d'ordre 2 (partiellement visualisé) à  $f_3 = 242\text{Hz}$ . Il est pertinent d'observer sur les diagrammes polaires que les différents points présentent des déphasages importants (surtout pour  $f_1$  et  $f_3$ ) et induisent des modes complexes généralement associés aux systèmes dissipatifs sans «bonnes» propriétés de symétrie (cf Ref. [7]). Une conséquence est l'apparition d'ondes propagatives le long de la glotte (cf. animation lors du congrès). À noter également l'absence de modes supérieurs dans la direction perpendiculaire (gauche-droite sur les représentations).

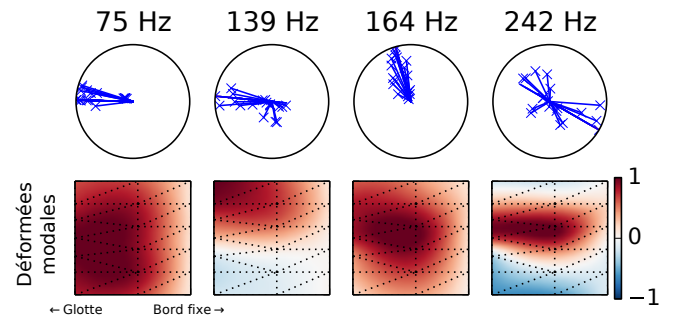


FIGURE 6 – Diagrammes de phase des coefficients modaux (haut) et composante axiale des déformées modales (en bas) pour les premiers modes identifiés.

## 6 Conclusion

Les résultats présentés ici sont très partiels. Ils seront complétés d'ici le congrès grâce à la disponibilité d'un vibromètre laser à balayage dont la livraison a malheureusement pris du retard. Ils permettent néanmoins de dégager un intérêt dans la complémentarité des diverses techniques de mesure, notamment quant à la reconstitution tridimensionnelle du champ de déplacements, et non plus par la simple observation de l'aire glottique ou de son ouverture maximale. Il est de plus nécessaire d'aller plus loin dans l'exploitation couplée des mesures, y compris par des traitements conjoints par exemple par les méthodes SIMO ou MIMO couramment utilisées par la communauté de mécanique vibratoire.

Des travaux numériques portant sur la modélisation et la simulation des structures vibrantes sont menés en parallèle, montrant en particulier l'influence de la pression de gonflement sur les paramètres modaux, de manière semblable aux effets observés expérimentalement. Une autre direction de recherche consiste en l'extension de ces résultats dans le domaine des grandes vibrations, tout au moins de l'ordre de grandeur des mouvements produits en auto-oscillation. Ceci permettrait d'éclairer les mécanismes couplant les modes de vibrations et l'existence de l'onde mucosale chère à Titze et coll, notamment pour les mécanismes laryngés supérieurs.

## Remerciements

Les auteurs remercient Franz Chouly (LMB), Fabrice Richard et Vincent Walter (FEMTO-st) pour leur aimable discussion autour de la modélisation des structures et leur collaboration autour du vibromètre laser. Une partie du travail présenté a été mené au sein du projet ANR-12-PDOC-0018 VOFOCAM.

## Références

- [1] L. Bailly, X. Pelorson et coll. : Influence of a constriction in the near field of the vocal folds : Physical modeling and experimental validation, *J. Acous. Soc. Am.* **124**, 3296–3308 (2008).
- [2] J. Y. Bouguet : Pyramidal implementation of the lucas kanade feature tracker : Description of the algorithm (2002).
- [3] S. Bromage, M. Campbell et coll. : Open areas of vibrating lips in trombone playing, *Acta Acust. united Ac.* **96**, 603–613 (2010).
- [4] A. Chan, L. Mongeau et coll. : Vocal fold vibration measurements using laser doppler vibrometry, *J. Acous. Soc. Am.* **133**, 1667–1676 (2013).
- [5] J. S. Cullen, J. Gilbert et coll. : Brass instruments : Linear stability analysis and experiments with an artificial mouth, *Acta Acust. united Ac.* **86**, 704–724 (2000).
- [6] M. Deverge, X. Pelorson et coll. : Influence of collision on the flow through in-vitro rigid models of the vocal folds, *J. Acous. Soc. Am.* **114**, 3354–3362 (2003).
- [7] E. Foltete : *Identification modale de structures linéaires et faiblement non-linéaires*, Thèse de doctorat, Univ. Franche-Comté (1998).
- [8] J. Gilbert, S. Ponthus et coll. : Artificial buzzing lips and brass instruments : Experimental results, *J. Acous. Soc. Am.* **104**, 1627–1632 (1998).
- [9] N. Hermant, X. Pelorson et coll. : New measurement method to derive mechanical parameters on a vocal fold replica, dans (*PEVOC9*), Marseille, France (2011).
- [10] — Étude de l'effet de masse ajoutées sur la production de sons voisés, dans *12ème CFA*, Poitiers (2014).
- [11] K. Ishizaka & J. L. Flanagan : Synthesis of voiced sounds from a two-mass model of the vocal chords, *Bell Sys. Tech. J.* **51**, 1233–1268 (1972).
- [12] F. Krebs, G. Artana et coll. : Constriction modes and acoustic output in an in-vitro self-oscillating vocal-fold model, dans *10ème CFA*, Lyon (2010).
- [13] N. J. C. Lous, G. C. J. Hofmans et coll. : A symmetrical two-mass vocal-fold model coupled to vocal tract and trachea, with application to prosthesis design, *Acta Acust. united Ac.* **84**, 1135–1150 (1998).
- [14] J. Lozada, X. Boutillon et coll. : Analyse modale sans transformée de fourier, dans *8ème CFA*, Tours (2006).
- [15] N. M. M. Maia & J. M. M. Silva, réds. : *Theoretical and experimental modal analysis*, Research Studies Press, Baldock, England (1997).
- [16] M. J. Newton, M. Campbell et coll. : Mechanical response measurements of real and artificial brass players lips, *J. Acous. Soc. Am.* **123**, –14 (2008).
- [17] X. Pelorson & X. Laval : An experimental replica of the vocal folds to study normal and pathological voice, dans *12ème CFA*, Nantes (2012).
- [18] O. Richards : *Investigation of the Lip Reed Using Computational Modelling and Experimental Studies with an Artificial Mouth*, Thèse de doctorat, Univ. Edinburgh (2003).
- [19] N. Ruty : *Modèles d'interactions fluide/parois dans le conduit vocal. Applications aux voix et aux pathologies*, Thèse de doctorat, INP Grenoble (2007).
- [20] N. Ruty, A. Van Hirtum et coll. : A mechanical experimental setup to simulate vocal folds vibrations. preliminary results, *ZAS Papers Ling.* **40** (2007).
- [21] B. H. Story & I. R. Titze : Voice simulation with a body-cover model of the vocal folds, *J. Acous. Soc. Am.* **97**, 1249–1260 (1995).
- [22] S. L. Thomson, L. Mongeau et coll. : Aerodynamic transfer of energy to the vocal folds, *J. Acous. Soc. Am.* **118**, 1689–1700 (2005).
- [23] C. Vilain : *Contribution à la synthèse de parole par modèle physique. Application à l'étude des voix pathologiques*, Thèse de doctorat, INP Grenoble (2002).

- [24] J. G. Švec, J. Horáček et coll. : Resonance properties of the vocal folds : In vivo laryngoscopic investigation of the externally excited laryngeal vibrations, *J. Acous. Soc. Am.* **108**, 1397–1407 (2000).